

# PC上部工の実物大供試体と実橋における 乾燥収縮ひずみについて

河中 涼一<sup>1</sup>・小林 仁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(株)ピーエス三菱 大阪支店 土木技術部 (〒530-6027大阪市北区天満橋OAPタワー27F)

プレストレストコンクリート構造物は、使用状態でのひび割れを許容しないために、耐久性に優れる構造形式である。しかし、ひび割れ発生限界状態で設計され、近畿地方整備局管内に連続して施工されたプレストレストコンクリート橋梁上部工(以下、PC橋)群に、完成後の比較的早い段階で、多くのひび割れによる損傷が発生し、社会的な問題となった<sup>1)</sup>。原因がコンクリートの乾燥収縮ひずみであると推察されたため、実橋を模した実物大供試体を製作し、実橋と伴にそのひずみを測定することが決定した。本報告は、実験開始から5年間の各供試体および実橋の計測結果報告と、各基準類との対比および考察を行うものである。

キーワード 乾燥収縮ひずみ、コンクリート橋梁上部工、ひび割れ、実物大供試体

## 1. はじめに

昨今、乾燥収縮ひずみが大きなコンクリートを用いたPC橋上部工において、ひび割れなどの初期欠陥が問題となり、平成21年2月に京都大学宮川教授を委員長とする「京奈和自動車道紀北東道路に使用する生コンクリートの品質確保に関する検討会」が開催された。その中で、PC橋に生じる実際のひずみ量と各基準類との相関を明らかにするために、実構造物とそれを模した実物大供試体を製作し、5年間を目標にこれらの乾燥収縮ひずみを測定することなどが決定した。

本報告は、実験開始から5年間の各供試体および実橋の計測結果報告と、各基準類との対比および考察を行うものである<sup>2)</sup>。

なお、実物大供試体は平成22年12月に紀北東道路事業における上部工工事の一環として製作され、当初は実橋建設現場の敷地内に設置していた。その後、紀北東道路の開通工程に合わせて平成24年2月より近畿技術事務所に移設し、測定を継続した。

## 2. 実験概要

### (1) 実物大供試体の製作

実験には図-1に示す箱桁供試体を2体、図-2に示すウェブを切り出した寸法の角柱供試体を5体用いた。箱桁供試体は計測を行った実橋と同一断面であり、図-1に示すとおり、断面の中央および表面から100mmの位置に4線式ひずみ計(容量: $\pm 5,000 \times 10^{-6}$ 、標点距離:100mm、見かけの弾性係数:約40N/mm<sup>2</sup>)を埋

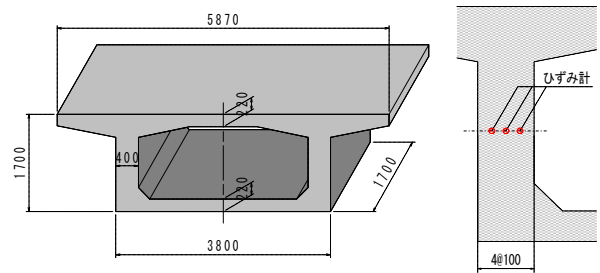


図-1 箱桁供試体寸法および計測位置図

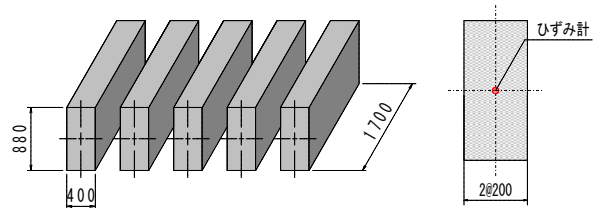


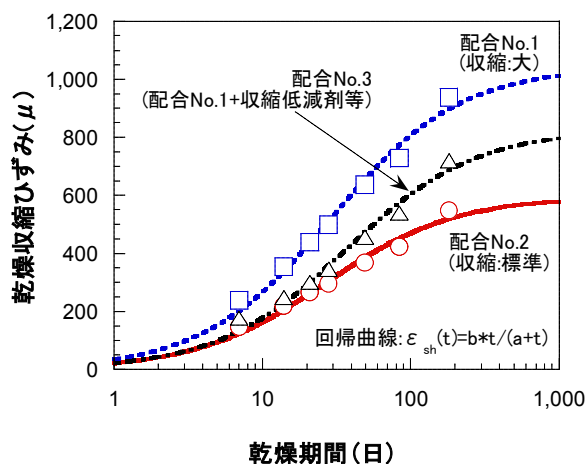
図-2 角柱供試体寸法および計測位置図



写真-1 供試体設置状況(近畿技術事務所)

表－1 コンクリートの配合

| 配合 No. | 粗骨材の最大寸法 Gmax (mm) | 水セメント比 W/C (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |             |           |           |      |
|--------|--------------------|----------------|---------|--------------|--------------------------|--------|-------------|-----------|-----------|------|
|        |                    |                |         |              | 水 W                      | セメント C | 混和材料 EX, RA | 細骨材 S1 S2 | 粗骨材 G1 G2 |      |
| 1      | 20                 | 43             | 4.5     | 41.9         | 165                      | 384    | -           | 508       | 217       | 1020 |
| 2      |                    |                |         | 42.8         |                          |        |             | 519       | 222       | -    |
| 3      |                    |                |         | 43.6         |                          |        |             | 535       | 229       | 989  |



図－3 JIS A 1129 長さ変化試験の結果

め込み、ひずみの経時変化を測定した。本報告の図に示すひずみ計の計測結果は、1時間ごとの計測値を1ヶ月単位で平均し、それぞれを結んで折れ線としたものである。写真－1に近畿技術事務所に移設された後の供試体設置状況を示す。

## (2) コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートは、乾燥収縮ひずみが大きくなる粗骨材を用いたコンクリート(配合No.1)、乾燥収縮ひずみが標準的な粗骨材を用いたコンクリート(配合No.2)、および配合No.1に収縮低減剤と膨張材を添加したコンクリート(配合No.3)の3種類である。用いたコンクリートの配合を表－1に示す。実橋の施工には乾燥収縮ひずみが標準的な粗骨材を用いたコンクリート(配合No.2)を用いた。

## (3) JIS試験に基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみ

それぞれのコンクリートのJIS A 1129長さ変化試験の結果を図－3に示す。これらの結果をそれぞれ双曲線で回帰すると、配合No.1、No.2およびNo.3の乾燥収縮ひずみの最終値はそれぞれ1,041 μ、595 μおよび826 μとなる。

# 3. 実験結果

## (1) 供試体のひずみ計測定結果とコア供試体から求めた乾燥収縮ひずみ

供試体の乾燥収縮ひずみを測定するために、箱桁供試体MODEL-AおよびMODEL-Bからコア供試体を採取した。コアの採取数は型枠脱型から71日後、191日後、344日後、528日後および1,661日後の計5回である。コアの採取位置は図－4に示すとおりであり、先ず供試体からφ70mm×500mmのコアを採取し、そのコアを実験室にて

表－2 箱桁供試体の配合と配筋量

| 供試体名    | 配合 No.      | 軸方向鉄筋量  |
|---------|-------------|---------|
| MODEL-A | No.1(収縮:大)  | D13@250 |
| MODEL-B | No.2(収縮:標準) | D13@250 |

表－3 角柱供試体の配合と配筋量

| 供試体名    | 配合 No.             | 軸方向鉄筋量  |
|---------|--------------------|---------|
| model-a | No.3(No.1+収縮低減剤など) | D13@250 |
| model-b | No.1(収縮:大)         | D13@250 |
| model-c | No.2(収縮:標準)        | D13@250 |
| model-d |                    | D22@125 |
| model-e |                    | なし      |

φ50×100mmに再成形して計測に用いた。コアを採取した位置はいずれもウェブと上床版の付け根近傍で、乾燥条件に大きな差はない。φ50×100mmの円柱供試体の長さ変化の測定には、写真－2に示すリニアゲージ(検長:100mm、最小目盛り:5/10,000mm)を用いた。箱桁供試体MODEL-AおよびMODEL-Bから採取したコア供試体の収縮測定結果を図－5および図－6に示す。これらの結果より、MODEL-Aの乾燥収縮ひずみが、MODEL-Bのものよりも大きくなっていることが分かる。また、採取日が遅くなるに連れて、乾燥収縮ひずみの最終値も小さくなっている。

図－7は、図－5および図－6に示される乾燥収縮ひずみの経時変化を双曲線で回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値を縦軸に、型枠脱型後からコアを採取した時点までの経過時間を横軸に示した図である。すなわち、図の横軸は、箱桁供試体の乾燥期間に相当する。この図における型枠脱型後からコアを採取した時点までの経過時間0日における乾燥収縮ひずみの最終値が、乾燥開始と同時に測定を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値に等しくなる。従って、図－8に示されるように、型枠脱型直後にコアを採取したとして、そのコアを成形した供試体から得られる乾燥収縮ひずみの最終値と、型枠脱型から71日後、191日後、344日後および582日後に採取されたコアより得られるコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値の差が、材齢7日より乾燥を開始した箱桁供試体のコンクリートの乾燥期間71日、191日、344日および582日における乾燥収縮ひずみに一致する。この方法<sup>3)</sup>を用いて各採取日における箱桁供試体の乾燥収縮ひずみを推定した結果が、図－9および図－10に示す■である。図－9および図－10では、これらの結果と、式(1)のコンクリート標準示方書(2012年制定)に示される乾燥収縮ひずみの計算値、道路橋示方書に示される乾燥収縮ひずみの計算値および供試体に埋設したひずみ計による計測結果を比較する。

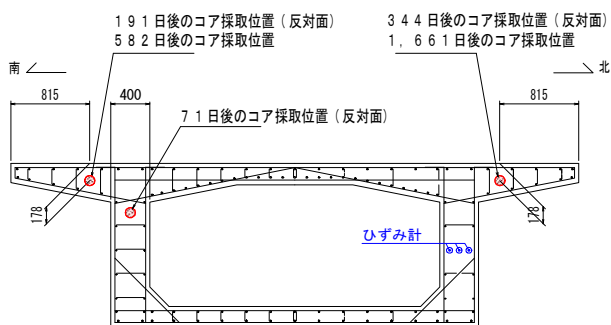


図-4 コア採取位置正面図(東側から)

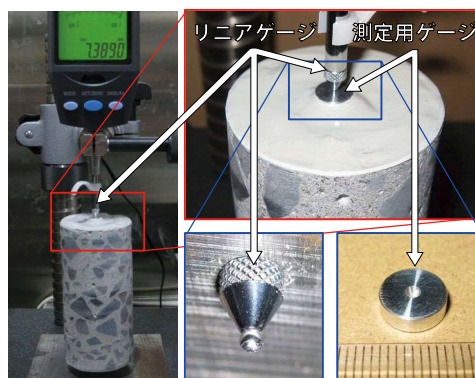


写真-2 コア供試体の収縮測定

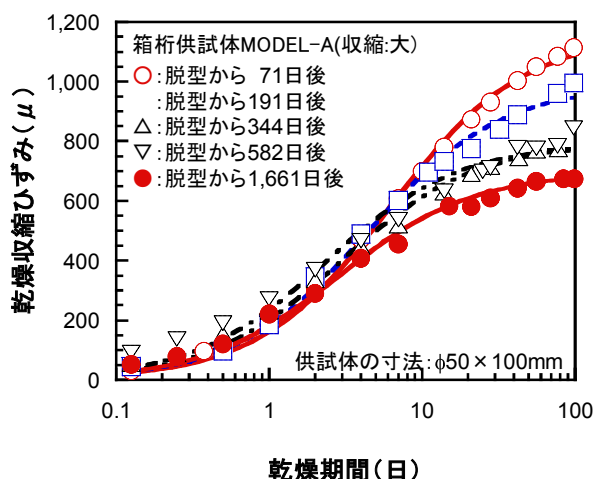


図-5 MODEL-Aのコアの乾燥収縮ひずみ

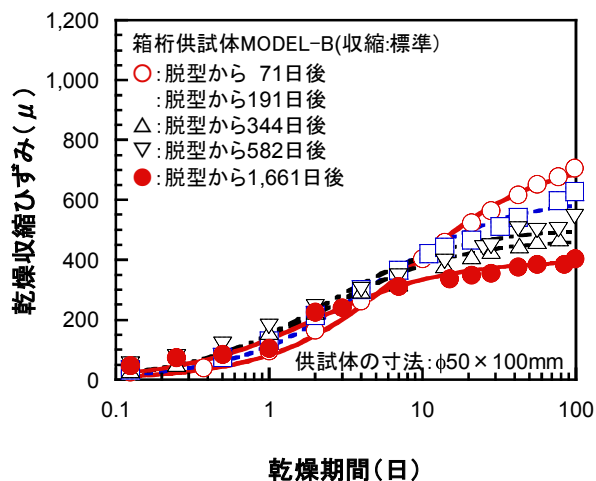


図-6 MODEL-Bのコアの乾燥収縮ひずみ

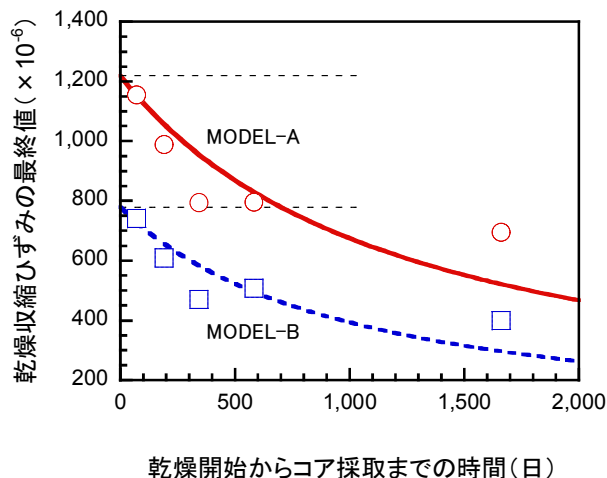


図-7 コア供試体における乾燥収縮ひずみの最終値

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{\frac{1-RH/100}{1-0.6} \cdot b \cdot t}{\left(\frac{d_b}{100}\right)^2 \cdot a + t} \quad \cdots (1)$$

式(1)中の乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項aおよび乾燥収縮ひずみの最終値bにはJIS A 1129に従い100×100×400mmの角柱供試体より求めた値を、部材を代表する厚さdbにはコアを採取した部位の厚さ400mmを用いた。また、相対湿度には供試体を設置した現地の計測結果より、年間の平均相対湿度である70%を用いている。

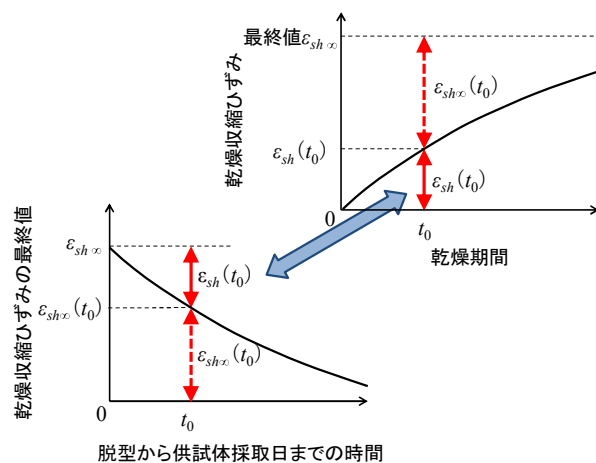


図-8 コア供試体による乾燥収縮ひずみの推定方法

これらの図から、コア供試体を用いて求めた箱桁供試体の乾燥収縮ひずみは、いずれも式(1)を用いて算出した計算値と概ね一致していることが分かる。また、箱桁供試体および角柱供試体のひずみ計から得られた測定値はコア供試体の乾燥収縮ひずみ量およびコンクリート標準示方書の計算値よりも小さいが、これは雨露の影響によって乾燥収縮ひずみが低減していることや、特に配合No.1を用いた供試体は表面のひび割れによって収縮ひずみが解放された可能性があることなどが原因だと考えられる。一方、道路橋示方書の計算式から算出される乾燥

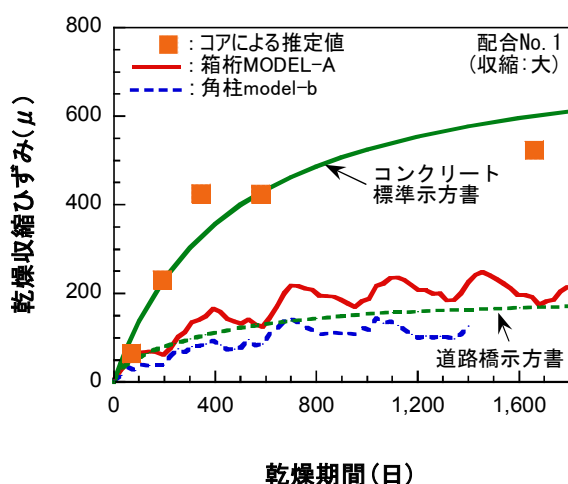


図-9 配合1を用いた供試体の乾燥収縮ひずみ

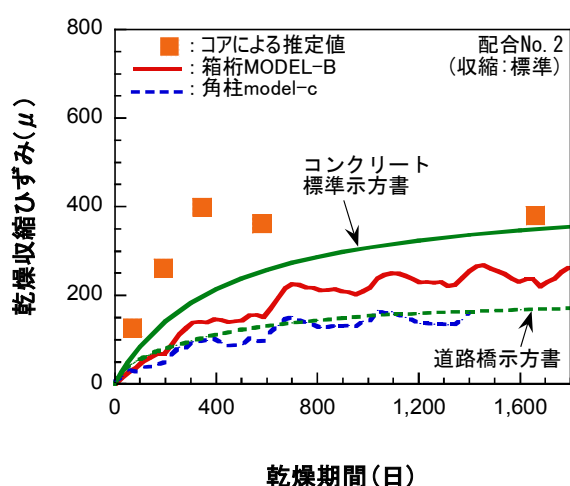


図-10 配合2を用いた供試体の乾燥収縮ひずみ

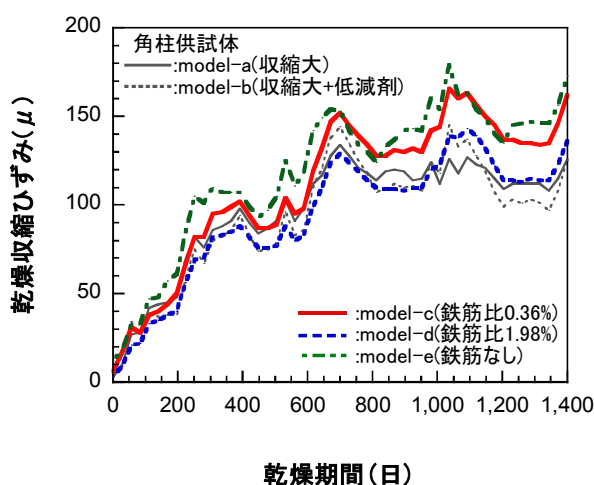


図-11 角柱供試体の計測結果

収縮ひずみと箱桁供試体および角柱供試体のひずみ計から得られた測定値は概ね近い値を示しているが、道路橋示方書はクリープによる応力緩和の影響を考慮するために算出されるひずみ量を低減しているため、結果的に測定値に近い値を示していると考えられる。

## (2) 角柱供試体の計測結果

図-11に角柱供試体model-a～eの計測結果を示す。まず乾燥収縮ひずみが標準的な粗骨材を用いたコンクリート(配合No.2)で製作したmodel-c、model-dおよびmodel-eについて、これらの供試体はその軸方向鉄筋量が異なり、鉄筋比はそれぞれ標準的な配筋量である0.36%、その5倍強である1.98%および無筋の0.00%である。この図から、それぞれの角柱供試体の乾燥収縮ひずみ量は、鉄筋量が多く拘束効果が大きくなる順に小さくなっていることが分かる。また、乾燥収縮ひずみが大きくなる粗骨材を用いたコンクリート(配合No.1)で製作したmodel-aおよびmodel-bは、配合No.2で製作した角柱供試体と同程度の乾燥収縮ひずみを示しているが、これは供試体表面のひび割れによって収縮ひずみが解放されたことなどが原因であると



写真-3 実橋のひずみ計測位置

考えられる。

また、角柱供試体の計測結果は、いずれも同じ骨材と同じ軸方向鉄筋量で製作した箱桁供試体の結果よりも小さな値となっている。これは、角柱供試体の体積表面積比が箱桁供試体のそれよりも約30%大きいことや、箱桁供試体のように上床版が存在しないことから雨露など外部環境の影響を受けやすかったことが原因であると推測される。

## (3) ホイットモア式ひずみ計による計測

実物大供試体の乾燥収縮ひずみの測定には埋め込み型ひずみ計を用いた電氣的計測を行ったが、その寿命や不具合に対するバックアップとして、ホイットモア式ひずみ計(検長250mm, 最小目盛1/1,000mm)を用いて、別途供試体表面に設置したゲージを手動でも計測することとした。結果を図-12および図-13に示す。この手動計測は埋め込み型ひずみ計による計測を終了した現在も年4回程度計測しており、今後も継続する。

## (4) 実橋の計測結果

実橋のひずみ計測は写真-3に示すPC箱桁方杖ラーメン橋で行い、箱桁供試体と同断面である写真に示す箇所ウェブにひずみ計を設置して行った。図-14は、

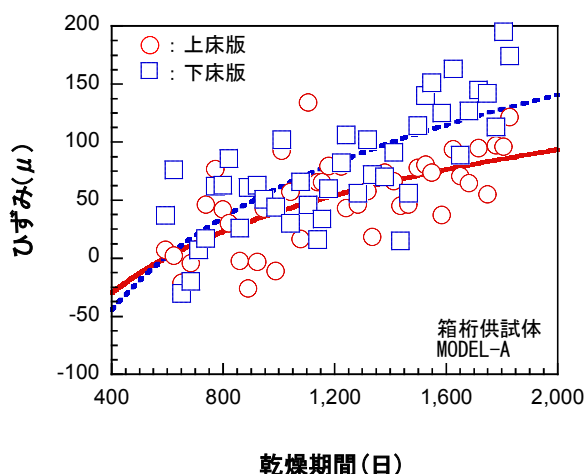


図-1 2 箱桁供試体の手動によるひずみ測定結果

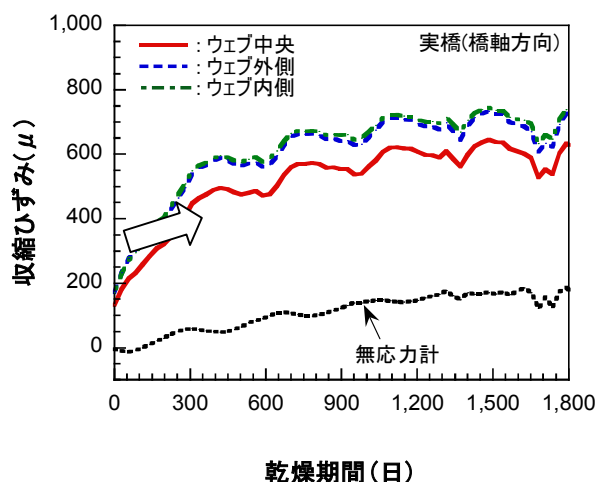


図-1 4 実橋のひずみ計測結果

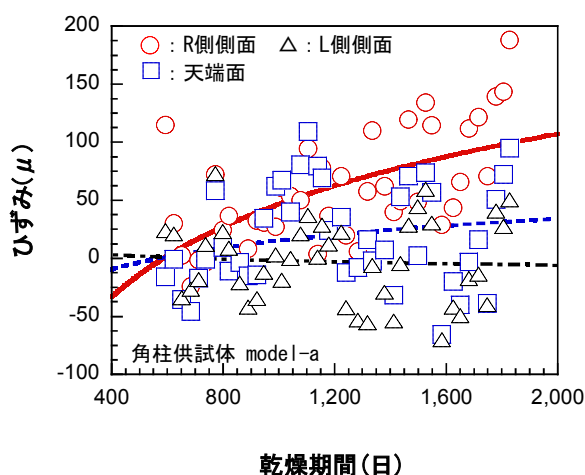


図-1 3 箱桁供試体の手動によるひずみ測定結果

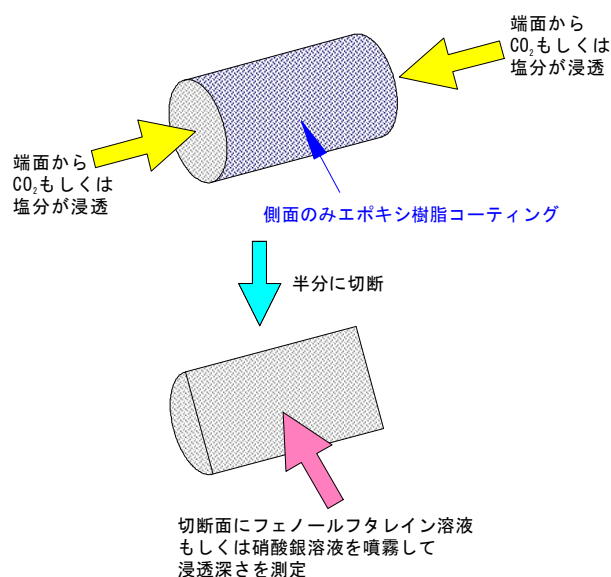


図-1 5 塩化物および中性化試験概要図

実橋の橋軸方向のひずみ計測結果を示す。この図から分かるように、乾燥期間5年におけるウェブ外側、中央および内側の橋軸方向のひずみ量はいずれも約600 $\mu$ である。この計測値は、主桁の軸方向に対して導入されたプレストレスによる弾性変形およびクリープの影響を含んでいる。道路橋示方書よりプレストレス導入から5年後のクリープおよび弾性ひずみを求めると合計で約430 $\mu$ となる。よって、クリープの影響を控除した実橋の乾燥収縮ひずみ量は約170 $\mu$ となる。これは図中に示す無応力計の計測結果と概ね一致する。また、図-7および図-8に示す箱桁供試体MODEL-AおよびMODEL-Bのひずみ計による計測結果とも概ね一致する。

#### (5)塩化物浸透試験結果

各配合によって製作したコンクリートの耐久性を比較するために箱桁供試体からコアを採取して塩化物浸透性試験を実施した。コアは乾燥開始からそれぞれ約900日が経過した箱桁供試体から採取し、図-15に示すとおり両端面の1方向からのみ塩化物が浸入するよう側面にエポキシ樹脂コーティングを行った。表-3に示すとおり

り、コアはMODEL-AおよびMODEL-Bの上床版およびウェブから採取し、いずれもコアの片側端面には0.10mm以下のひび割れが生じている箇所を選定した。供試体は濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に約530日間浸漬させ、乾式カッターにて切断し、切断面に硝酸銀水溶液を噴霧することで塩化物イオン浸透深さを測定した。実験の結果を図-16および図-17に示す。またコアNo.1の試験状況を写真-4に示す。塩化物イオン浸透深さは、コンクリートの表面にひび割れがある場合、その幅が大きいほど塩化物イオンの浸透深さが深くなることが分かった。一方、コンクリート表面にひび割れがない場合は、コンクリートの収縮性状によらず大きな差は見られないことが分かった。

#### (6)中性化深さ試験結果

前述の試験と同様、角柱供試体からコアを採取して中性化深さ試験を実施した。供試体の作成方法やコア採取日などは塩化物浸透性試験と同様である。供試体は温度

表-3 塩化物イオン浸透試験に用いたコアの種類

| コア No. | 供試体No.          | 採取箇所 | ひび割れ面の最大ひび割れ幅 (mm) |
|--------|-----------------|------|--------------------|
| ①      | MODEL-A (収縮:大)  | 上床版  | 0.10               |
| ②      | MODEL-B (収縮:標準) | 上床版  | 0.05               |
| ③      | MODEL-A (収縮:大)  | ウェブ  | 0.05               |
| ④      | MODEL-B (収縮:標準) | ウェブ  | 0.05以下             |



写真-4 塩化物イオン浸透試験状況



写真-5 中性化深さ試験状況

20℃、湿度60%、炭酸ガス濃度5%の中性化促進槽内に設置し、約630日後に取り出して中性化深さを測定した。その結果、写真-5に示すとおり、いずれの供試体も中性化はほとんど進行していなかった。塩化物浸透性試験と異なり、気体では液体のように表面張力が作用せず因子の浸入速度が低かったことが、供試体ごとで差が生じなかった原因であると考えられる。

#### 4. まとめ

・箱桁供試体からコア供試体を採取して求めた乾燥収縮ひずみは、コンクリート標準示方書から求まる計算値と概ね一致することが分かった。ただし、ひずみ計で計測した値は、外部環境やひび割れの影響で小さめに算出されることが分かった。

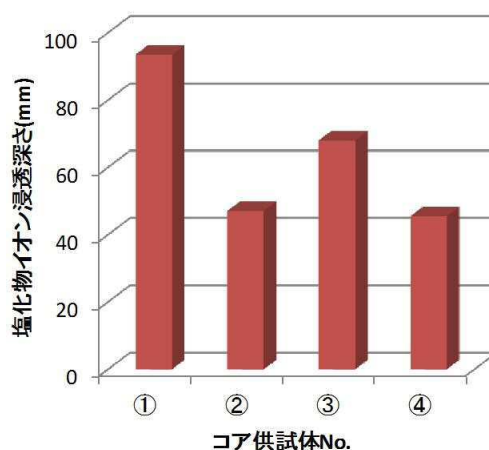


図-16 塩化物イオン浸透試験(ひび割れ面)

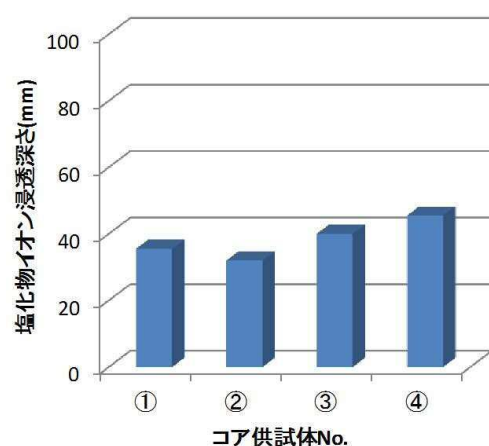


図-17 塩化物イオン浸透試験(ひび割れなし)

- ・角柱供試体の計測結果より、鉄筋量の違いによるひずみの拘束効果が確認できた。
- ・実橋のウェブ内に設置したひずみ計から得られた計測値は、箱桁供試体に設置したひずみ計の計測値と概ね一致することが分かった。
- ・塩化物イオン浸透深さは、コンクリート表面にひび割れがない場合、その収縮性状によらず大きな差は見られないことが分かった。

#### 参考文献

- 1) (社)土木学会：第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会報告書，2010.3.
- 2) 河中涼一ほか：約2年間実環境に曝露したPC上部工の実物大供試体における乾燥収縮ひずみ，第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2013.10
- 3) 小林仁ほか：乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.69, No.4, 377-389, 2013